蒙脱石的作用机制及其在家禽生产中的应用[1]

陈继发　康克浪　曲湘勇*

（湖南农业大学动物科学技术学院，湖南畜禽安全生产协同创新中心，长沙 410128）

摘　要：蒙脱石（MMT）是一种天然的层状硅铝酸盐矿物，具有吸附霉菌毒素、重金属、细菌，修复和保护消化道黏膜，防治腹泻等功效；此外，改性 MMT 还具有抗菌作用。研究表明，MMT 能提高动物生产性能、提升产品品质、改善肠道健康。本文阐述了 MMT 的理化特性、改性方法、主要作用及机制，综述了国内外学者在家禽生产中应用 MMT 的最新研究成果。

关键词：蒙脱石；改性；作用机制；家禽；应用

中图分类号：S816.7

随着全球环境污染的日益严重，各种环境污染物对畜禽和人类健康的威胁日渐加重，霉菌毒素、细菌和重金属等环境毒物因其具有隐秘性、潜伏性、危害性和长期性，已引起世界各国的高度重视。采用一定的调控技术减轻或消除以上环境毒物对畜禽的危害和造成的食品安全隐患是饲料科学的研究重点。蒙脱石（montmorillonite,，MMT）是一种硅铝酸盐矿物，有良好的离子交换性、吸附性和膨胀性，能在动物肠道中吸附霉菌毒素、重金属、细菌，修复和保护消化道黏膜，防治腹泻[1-4]；此外，改性 MMT 还具有抗菌作用[5]。研究表明，动物饲粮中添加 MMT 及其改性产品能提高生产性能、提升产品品质、改善肠道健康[6-8]。本文阐述了 MMT 的主要特性和常用改性方法，总结了 MMT 的主要作用及机制，并综述了 MMT 在家禽生产中的应用效果，以期为 MMT 更好的应用于饲料行业提供参考。

1　MMT 的主要特性

MMT 为膨润土的主要成分，属于 2:1 型层状硅铝酸盐矿物，即 MMT 的每层结构由 2 个共顶联接的硅氧四面体片中间夹着 1 个共棱联接的铝氧八面体片构成[9]。由于层间域的存在，MMT 具有内外表面积，比表面积大；其颗粒极细，表面分布着无数微孔，微孔容积大，具有表面吸附能力[10]。此外，MMT 晶层中存在离子同晶置换，铝氧八面体中心离子三价铝离子（Al^{3+}）被二价镁离子（Mg^{2+}）、二价锌离子（Zn^{2+}）等置换或硅氧四面体中四价硅离子（Si^{4+}）被 Al^{3+}所取代，使层间产生强弱不同的永久性负电荷，为保持晶体电中性，晶层间会吸附环境中的阳离子，发生离子交换作用，因此有静电吸附能力[11]。因 MMT 有吸附性，可将极性水分子吸入晶层间，与可交换性阳离子接触发生水合反应，层间距扩大，体积可增加数倍，具有膨胀性[9]。

2　MMT 的改性方法及原理

为进一步提升 MMT 性能，国内外学者对其进行了系统的改性研究，并取得了一定成果。

收稿日期：2017-10-11

基金项目：湖南畜禽安全生产协同创新中心专项资金（CICAPS）；湖南省研究生科研创新项目（CX2016B299）

作者简介：陈继发（1992—），男，湖南邵阳人，博士研究生，研究方向为家禽营养与健康养殖。E-mail: Jifachen66@yeah.net

*通信作者：曲湘勇，教授，博士生导师，E-mail: quxy99@126.com

常见的改性方法有有机改性、无机改性和复合改性。

2.1 有机改性

利用 MMT 层间阳离子的可交换性，可将有机改性剂引入晶层间，实现 MMT 的有机化。改性后 MMT 兼具亲水、亲油性，晶层间距进一步扩大，孔隙增多，吸附性能大幅提升；此外，可将有杀菌作用的阳离子表面活性剂植入其晶格中，使改性后 MMT 具有抗菌功效。当前，最热门的有机改性剂为季铵盐和胺类化合物，如十二烷基三甲基溴化铵（DTAB）、十六烷基吡啶（CPB）。Zeng 等[12]研究表明，DTAB 改性 MMT 吸附玉米赤酶烯酮（ZEA）的效率是天然 MMT 的 8.9 倍；体外试验发现，CPB 改性 MMT 对沙门氏菌有很强杀灭作用[13]。

2.2 无机改性

MMT 的无机改性主要利用其膨胀性和阳离子交换性，将一些羟基化金属阳离子插入 MMT 晶格中，使其层与层撑开，形成 MMT 层间化合物，经进一步加热脱羟或脱氢后，转化成稳定的柱状金属氧化物簇，形成层柱状结构的新物质。改性后 MMT 层间距进一步增大，微孔数量、容积也增大，具有更强的吸附力。Daković等[14]研究发现，载锌 MMT 结合黄曲霉毒素 B_1（AFB_1）的效果明显强于天然 MMT；Bekic 等[15]报道，载铝、载铁 MMT 对 ZEA 的吸附效果优于天然 MMT。此外，可将具有抗菌性能的阳离子引入 MMT 晶层间，制成 MMT 抗菌剂，许多体内、外试验已证实抗菌阳离子改性 MMT 具有抑菌、杀菌作用[16-20]。

2.3 复合改性

复合改性是指 2 种或 2 种以上的有机、无机改性分子或离子一起进入 MMT 晶层中，共同作用于柱撑体，形成柔性和刚性柱子，使 MMT 具有更优越的性能。目前，复合改性 MMT 主要应用于工业废水处理，其可有效吸附污水中苯酚和苯并芘[21]。霉菌毒素是一类性质稳定的低分子有毒化合物，与以上污染物类似，推测复合改性 MMT 对霉菌毒素也有一定吸附作用，其吸附性能可能优于单一的改性 MMT。关于复合改性 MMT 应用于吸附霉菌毒素的研究鲜有报道，值得探讨。

3 MMT 的主要作用及机制

3.1 吸附霉菌毒素

研究表明，MMT 对黄曲霉毒素（AF）[22]或 AFB_1[23]、ZEA[12]、伏马菌素[24]和 T-2 毒素[7]等均具有吸附作用，能缓解其对动物的危害。MMT 吸附霉菌毒素的相关机制如下：多数霉菌毒素分子结构中含有-OH、$-NH_2$ 等极性基团或 C=C、$-C_6H_5$ 等可极化基团，能通过表面吸附力、静电吸附和分子间作用力吸附在 MMT 的多孔结构中，且呈刚性平面分子结构的霉菌毒素能进入其内表面，进一步扩大吸附位点，同时与晶层间可交换性金属离子发生相互作用，使其不易被解吸，形成稳定的 MMT−霉菌毒素复合物，使霉菌毒素的生物有效性降低或丧失，随后通过动物肠道排出体外[25]。

3.2 吸附细菌、杀菌

天然 MMT 基本无杀菌、抑菌功效，但对大肠杆菌和沙门氏菌等细菌具有吸附作用[13,26]。

MMT 具有水化膨胀、分散特性，膨胀后带负电的板块表面与带正电的边缘相连接，形成具有"凝胶-溶胶-凝胶"触变特性的"车厢"式悬浮物，且 MMT 可剥离成尺寸与细菌相近，表面带电的片状颗粒，这种"车厢"式的悬浮颗粒，可将细菌"锁定"在车厢中，"车厢"通过肠蠕动而排出体外，将所吸附的细菌清除[26-27]。经抗菌金属离子或阳离子表面活性剂改性后的 MMT 有抗菌作用，其抗菌的主要机制如下：多数细菌表面带有负电[28]，而金属离子或阳离子表面活性剂改性 MMT 带正电，能通过静电引力吸附表面带负电的细菌[29]。改性 MMT 表面富集了抗菌金属离子或阳离子表面活性剂，其可以直接作用于细菌，导致细菌细胞膜的通透性增加，营养物质外溢，改变细菌形状，使细菌胞内酶从菌体释放；此外，还可使细菌内钾离子（K^+）释放出来，抑制细菌呼吸代谢的三羧酸循环途径，导致细菌死亡[13,16]。

3.3　吸附重金属

MMT 能吸附饲粮中的重金属，缓解其对动物的毒害作用。在高铜饲粮中添加膨润土可有效减少绵羊肝脏中铜的蓄积量，缓解了铜中毒的发病率和中毒症状[3]。此外，MMT 对水中重金属也有吸附作用，能有效处理水体重金属污染[30]。MMT 对重金属的吸附作用主要利用其阳离子交换性、吸附性和水化膨胀的特性。

3.4　防治腹泻

Hu 等[31]报道，氧化锌-MMT（ZnO-MMT）防治仔猪腹泻的效果不亚于氧化锌，且剂量可以减少 4 倍；Song 等[32]研究指出，载铜 MMT（Cu-MMT）可有效缓解仔猪腹泻，与金霉素抗腹泻的效果相当；此外，钙质 MMT（Ca-MMT）能降低肉鸡腹泻的发病率[6]。MMT 对动物消化道内细菌及毒素有吸附、抑制作用，可有效阻断病原微生物黏附，减少肠道细菌感染及移位；同时能与消化道黏液蛋白结合，增加黏液量，并提高黏液的内聚力和柔韧性[4]；此外，MMT 具有黏塑性，晶层之间可以滑动打开，在消化道延展，形成连续的保护膜，维护消化道黏膜屏障功能，进而起到防治腹泻的作用。

4　MMT 在家禽生产中的应用

4.1　提高生产性能

大量研究表明，MMT 能有效缓解饲粮霉菌毒素对家禽造成的危害，提高生产性能。Yang 等[7]指出，MMT 对 T-2 和 HT-2 毒素造成的肉鸡体增重降低、料重比增加有明显改善作用；在 AFB_1 污染饲粮中添加 Ca-MMT，肉鸡体重、平均日采食量显著增加，饲料转化率显著提高[33]；Ca-MMT 明显缓解了产气荚膜梭菌或其与 AF 联合攻毒对肉鸡生长性能产生的不利影响[6]。此外，MMT 也能减轻霉菌毒素对肉鸭[8]、蛋鸡[34]生产性能造成的负面影响。MMT 应用于正常饲粮（无霉菌毒素超标）中也能改善家禽的生产性能。饲粮中添加 Ca-MMT 蛋鸡产蛋率提高了 10.21%，料蛋比降低了 5.63%[35]；饲粮中添加 ZnO-MMT 肉鸡平均日增重、平均日采食量显著增加，料重比降低，而天然 MMT 对肉鸡生长性能无显著影响[17]；饲粮中添加 Cu-MMT 显著提高了肉鸡平均日增重，降低料重比，而添加天然 MMT 无显著作用[18]。综上，MMT 能有效干预霉菌毒素对家禽的毒性作用，改性 MMT 提高家禽生产性能的效果

优于天然 MMT。MMT 改善动物生产性能可能由于以下几点：1）在肠道中有效吸附饲粮中霉菌毒素，降低其生物有效性；2）吸附或抑制肠道细菌及毒素，修复和保护消化道黏膜，改善肠道微生态环境；3）提高胃肠道消化酶活性，促进营养物质吸收[17]。由于改性 MMT 的各项性能得到大幅提升，且承载到 MMT 的物质本身也具有一定营养、免疫等功效，进而发挥出更好的作用。

4.2　提升产品品质

MMT 能够影响肉鸡的胴体组成，在 AFB_1 污染饲粮中添加天然、改性 MMT 均显著提高了肉鸡的胸肌率和腿肌率，全净膛率也有提高，而腹脂率有不同程度降低[36]。MMT 可有效减少霉菌毒素、重金属等在家禽产品中残留。Yang 等[7]研究发现，肉鸡采食 T-2 和 HT-2 毒素污染饲粮后 1 h 便可在头部、肌肉、小肠、肝脏等器官组织中检测到毒素，而添加 MMT 组仔鸡以上部位检测不出毒素或毒素含量显著降低；膨润土显著减少了 AFB_1 在肉鸡肝脏中残留[37]；Desheng 等[38]报道，MMT 显著降低了肉鸡骨骼中氟、铅浓度。此外，MMT 对蛋品质有一定改善作用，能明显提高鸡蛋蛋比重、蛋白高度和蛋黄比例[39]；Ca-MMT 有增加锌、锰在鸡蛋蛋黄中沉积量的趋势[35]。当前，消费者对畜禽产品品质和食品安全的关注越来越多，以上研究提示，MMT 能降低动物产品中有毒物质含量，且可能有益于提高产品营养价值。目前，关于 MMT 对畜禽产品品质影响的研究报道较少，其是否利于生产安全、优质的动物产品还需进一步探讨。

4.3 增强机体抗氧化、免疫功能

MMT 对霉菌毒素诱导的氧化应激有很好的干预作用。Prvulović等[23]报道，膨润土对 AFB_1 造成的肉鸡肝脏、肾脏氧化损伤有明显缓解作用，显著提高以上组织中抗氧化酶活性，降低丙二醛含量；饲粮添加 Ca-MMT 减轻了 ZEA 对育成蛋鸡造成的氧化损害，显著提高了血清抗氧化酶活性，降低了丙二醛含量[40]。此外，MMT 应用于正常饲粮中的研究也表明，其能增强机体的抗氧化能力[35]。目前，缺乏关于 MMT 调节机体抗氧化功能分子机制的研究，其是否通过调控相关抗氧化信号通路，激活其下游抗氧化酶基因 mRNA 和蛋白质表达，而提高机体抗氧化能力尚需深入探讨。免疫器官指数是评价家禽免疫性能的重要指标，在 AFB_1 污染饲粮中添加 Ca-MMT，肉鸭脾脏和胸腺指数显著提高[8]；Shi 等[41]也指出，钠质 MMT 能明显缓解 AF 对肉鸡免疫器官发育产生的负面影响。免疫球蛋白（Ig）A、IgG、IgM 是家禽直接参与体液免疫反应的主要免疫分子，Ca-MMT 能有效扭转 AFB_1 对肉鸭造成的免疫抑制，显著提高血清 IgG、IgM 含量[8]。肝脏作为最大的网状内皮细胞吞噬系统，是机体免疫系统的重要组成部分。MMT 对霉菌毒素的肝毒性也有干预作用，霉菌毒素污染饲粮中添加 MMT，蛋鸡[35]、肉鸡[42]、火鸡[43]血清中碱性磷酸酶、谷草转氨酶或谷丙转氨酶活性显著降低；在肉鸡、火鸡上的试验发现，膨润土对 AFB_1 造成的肝脏病变有明显缓解作用[24,43-44]；此外，MMT 对 T-2 和 HT-2 毒素诱导的肝细胞凋亡有显著抑制效果，可通过调控 p53 信号通路，调节 B 淋巴细胞瘤-2 基因(*Bcl*-2)和 Bcl-2 相关 X 蛋白(*Bax*)mRNA 的表达水平[7]。综上，

MMT 能有效缓解霉菌毒素对家禽造成的氧化损伤和免疫抑制，且在正常饲粮中添加也能提高机体抗氧化、免疫性能，但其相关作用机制还有待深入研究。

4.4　改善肠道健康

MMT 能改善家禽肠道健康，维护肠黏膜屏障功能。Ca-MMT 缓解了 AFB_1 诱发的肉鸭肠黏膜损伤，显著提高了绒毛高度、绒毛高度/隐窝深度（V/C）值[8]；MMT 也明显改善了 AFB_1 诱导的火鸡肠道组织病理学变化[43]；Xia 等[18]报道，Cu-MMT 可显著提高肉鸡空肠绒毛高度、V/C 值。此外，Hu 等[17]应用尤斯灌流系统研究 ZnO-MMT 对肉鸡肠道通透性的影响，发现其显著降低了结肠甘露醇的渗透率和回肠、结肠菊糖的渗透率，提高了结肠跨上皮电阻值。以上研究说明，MMT 有利于维持家禽肠黏膜物理屏障功能，其作用可能与 MMT 缓解了霉菌毒素、细菌等对肠上皮细胞造成的损伤和修复、保护肠黏膜有关。Hu 等[17]还发现，ZnO-MMT 明显降低了肉鸡小肠和盲肠中梭菌数量；Cu-MMT 能显著降低肉鸡肠道有害菌数量，而增加有益菌数量[18]。此外，本课题组应用高通量测序技术发现，Ca-MMT 显著提高了蛋鸡盲肠部分有益菌属丰度[45]。可见，MMT 能优化肠道菌群结构，这与其吸附、抑制细菌密切相关。目前，关于 MMT 对家禽肠黏膜免疫屏障影响的研究鲜有报道，但前人对伊利石和沸石的研究表明，其可通过调控 Toll 样受体信号通路，抑制肉鸡肠道炎症反应[46]；能显著提高肉鸡小肠黏膜分泌型免疫球蛋白 A（sIgA）、IgG 含量，增强肠道免疫力[47]。鉴于 MMT 与以上硅酸盐矿物结构、性质的相似性，推测 MMT 对维持家禽肠道免疫屏障也具有一定作用，值得关注和探讨。

5　小　结

MMT 因其特殊的结构和理化特性，有吸附多种环境毒物、抗菌、防治腹泻等作用，作为饲料添加剂能够维护家禽肠道屏障功能，改善机体健康状况，提高生产性能，提升产品品质。但目前主要作为霉菌毒素吸附剂应用于动物生产中，因其适当改性后有很好的抗菌功效，且不产生耐药性、减少动物二次感染，可作为新型的抗菌剂。另外，有关 MMT 在畜禽生产中作用机制的研究较少，今后还需在以下几方面开展系统、深入地研究：1）探索新的改性技术，尤其是复合改性，提升 MMT 的吸附和抗菌性能，并通过体外、体内试验进行验证；2）研究不同动物饲粮中 MMT 的适宜添加量，因其可能在消化道中吸附养分，且过量添加可能有副作用；3）探讨正常、应激或逆境条件下 MMT 对动物的作用及机制，重点关注其调节肠道健康的作用机制；4）探讨 MMT 与益生菌、酸化剂或酶制剂等联合应用改善畜禽肠道健康的效果及机制；5）研究不同动物饲粮中改性 MMT 替代抗生素的应用效果。“无抗养殖”是全球畜牧业健康发展的必然趋势，随着 MMT 改性技术和“替抗”研究的不断推进、深入，MMT 及其改性产品将在未来动物生产中扮演更重要的角色。

参考文献：

[1]　ZHAO H Y,MAO X B,YU B,et al.Excess of dietary montmorillonite impairs growth

performance,liver function,and antioxidant capacity in starter pigs[J].Journal of Animal Sciences,2017,95(7):2943–2951.

[2] XIA M S,HU C H,XU G R,et al.Effects of copper-bearing montmorillonite (Cu-MMT) on *Escherichia coli* and diarrhea on weanling pigs[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2004,17(12):1712–1716.

[3] IVAN M,NEILL L,ALIMON R,et al.Effects of bentonite on rumen fermentation and duodenal flow of dietary components in sheep fed palm kernel cake by-product[J].Animal Feed Science and Technology,2001,92(1/2):127–135.

[4] ALBENGRES E,URIEN S,TILLEMENT J P,et al.Interactions between smectite,a mucus stabilizer,and acidic and basic drugs:*in vitro* and *in vivo* studies[J].European Journal of Clinical Pharmacology,1985,28(5):601–605.

[5] YE Y,ZHOU Y H,XIA M S,et al.A new type of inorganic antibacterial material:cu-bearing montmorillonite and discussion on its mechanism[J].Journal of Inorganic Materials,2003,18(3):569–574.

[6] CRAVENS R L,GOSS G R,CHI F,et al.Products to alleviate the effects of necrotic enteritis and aflatoxin on growth performance,lesion scores,and mortality in young broilers[J].The Journal of Applied Poultry Research,2015,24(2):145–156.

[7] YANG L C,ZHAO Z Y,DENG Y F,et al.Toxicity induced by *F*.poae-contaminated feed and the protective effect of montmorillonite supplementation in broilers[J].Food and Chemical Toxicology,2014,74:120–130.

[8] WAN X L,YANG Z B,YANG W R,et al.Toxicity of increasing aflatoxin B_1 concentrations from contaminated corn with or without clay adsorbent supplementation in ducklings[J].Poultry Science,2013,92(5):1244–1253.

[9] 王鸿禧.膨润土[M].北京:地质出版社,1980.

[10] MURRAY H H.Traditional and new applications for kaolin,smectite,and palygorskite:a general overview[J].Applied Clay Science,2000,17(5/6):207–221.

[11] JORDAN J W.The chemistry of clay-organic reactions[J].Clays and Clay Minerals,1975,23(4):336.

[12] ZENG L,WANG S P.Adsorption of zearalenone by montmorillonite[J].Advanced Materials Research,2013,683:343–347.

[13] HERRERA P,BURGHARDT R C,PHILLIPS T D.Adsorption of *Salmonella enteritidis* by cetylpyridinium-exchanged montmorillonite clays[J].Veterinary Microbiology,2000,74(3):259–272.

[14] DAKOVIĆ A,KRAGOVIĆ M,ROTTINGHAUS G E,et al.Preparation and characterization

of zinc-exchanged montmorillonite and its effectiveness as aflatoxin B_1 adsorbent[J].Materials Chemistry and Physics,2012,137(1):213–220.

[15] BEKCI Z M,ANTEP M K,MERDIVAN M,et al.Zearalenone removal in synthetic media and aqueous part of canned corn by montmorillonite K10 and pillared montmorillonite K10[J].Journal of Food Protection,2011,74(6):954–959.

[16] 郭彤,杨久仙,马玉龙,等.载铜蒙脱石体外杀菌效果及其机理[J].中国兽医学报,2014,34(7):1162–1168.

[17] HU C H,QIAN Z C,SONG J,et al.Effects of zinc oxide-montmorillonite hybrid on growth performance,intestinal structure,and function of broiler chicken[J].Poultry Science,2013,92(1):143–150.

[18] XIA M S,HU C H,XU Z R.Effects of copper bearing montmorillonite on growth performance,digestive enzyme activities,and intestinal microflora and morphology of male broilers[J].Poultry Science,2004,83(11):1868–1875.

[19] JIAO L F,LIN F H,CAO S T,et al.Preparation,characterization,antimicrobial and cytotoxicity studies of copper/zinc-loaded montmorillonite[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2017,8:27.

[20] XU G N,QIAO X L,QIU X L,et al.Preparation and characterization of nano-silver loaded montmorillonite with strong antibacterial activity and slow release property[J].Journal of Materials Science & Technology,2011,27(8):685–690.

[21] KEIZER P,BRUGGENWERT M G M.Adsorption of heavy metals by clay-aluminum hydroxide complexes[C]//BOLT G H,DE BOODT M F,HAYES M H B,et al,eds. Interactions at the Soil Colloid-Soil Solution Interface.NATO ASI Series (Series E:Applied Sciences).Dordrecht:Springer,1991,190:177–203.

[22] BAILEY C A,LATIMER G W,BARR A C,et al.Efficacy of montmorillonite clay (NovaSil PLUS) for protecting full-term broilers from aflatoxicosis[J].The Journal of Applied Poultry Research,2006,15(2):198–206.

[23] PRVULOVIĆ D,POPOVIĆ M,KOJIĆ D,et al.Effects of aluminosilicates on lipid peroxidation and antioxidants in aflatoxin B_1-induced tissue injury in chickens[J].Studia UBB Chemia,2014,59(2):51–62.

[24] MIAZZO R D,PERALTA M F,MAGNOLI C,et al.Efficacy of sodium bentonite as a detoxifier of broiler feed contaminated with aflatoxin and fumonisin[J].Poultry Science,2005,84(1):1–8.

[25] DI GREGORIO M C,DE NEEFF D V,JAGER A V,et al.Mineral adsorbents for prevention of mycotoxins in animal feeds[J].Toxin Reviews,2014,33(3):125–135.

[26] HU X R,LU G L,CHEN L S,et al.Study on the mechanism of the interaction between montmorillonite and bacterium[J].Acta Pharmacologica Sinica,2002,37(9):718–720.

[27] GIRARDEAU J P.Smecta aggregation by *E.coli*[J].Acta Gastroenterol Belg,1989,50(2):181.

[28] BREEN P J,COMPADRE C M,FIFER E K,et al.Quaternary ammonium compounds inhibit and reduce the attachment of viable *Salmonella typhimurium* to poultry tissues[J].Journal of Food Science,1995,60(6):1191–1196.

[29] GUO T,CAO S J,SU R,et al.Adsorptive property of Cu^{2+}-loaded montmorillonite clays for *Escherichia coli* K88 *in vitro*[J].Journal of Environmental Sciences,2011,23(11):1808–1815.

[30] BHATTACHARYYA K G,GUPTA S S.Kaolinite and montmorillonite as adsorbents for Fe(Ⅲ),Co(Ⅱ) and Ni(Ⅱ) in aqueous medium[J].Applied Clay Science,2008,41(1/2):1–9.

[31] HU C H,GU L Y,LUAN Z S,et al.Effects of montmorillonite-zinc oxide hybrid on performance,diarrhea,intestinal permeability and morphology of weanling pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2012,177(1/2):108–115.

[32] SONG J,LI Y L,HU C H.Effects of copper-exchanged montmorillonite,as alternative to antibiotic,on diarrhea,intestinal permeability and proinflammatory cytokine of weanling pigs[J].Applied Clay Science,2013,77–78:52–55.

[33] ECKHARDT J C,SANTURIO J M,ZANETTE R A,et al.Efficacy of a brazilian calcium montmorillonite against toxic effects of dietary aflatoxins on broilers reared to market weight[J].British Poultry Science,2014,55(2):215–220.

[34] YENICE E,MIZRAK C,CEYLAN N.et al.Effects of dietary sodium bentonite and mnnan oligosaccharide supplementation on performance,egg quality,blood and digestion characteristics of laying hens fed aflatoxin contaminated diet[J].Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi,2015,21(2):211–218.

[35] 陈继发,罗玲,曲湘勇,等.霉菌毒素吸附剂对产蛋鸡生产性能、蛋黄中微量元素含量、血清抗氧化和生化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(10):3183–3191.

[36] 王芳,张海军,王晶,等.蒙脱石对采食霉变花生粕型饲粮肉仔鸡生长性能和免疫机能的影响[J].动物营养学报,2016,28(5):1480–1488.

[37] MAGNOLI A P,MONGE M P,MIAZZO R D,et al.Effect of low levels of aflatoxin B_1 on performance,biochemical parameters,and aflatoxin B_1 in broiler liver tissues in the presence of monensin and sodium bentonite[J].Poultry Science,2011,90(1):48–58.

[38] DESHENG Q,FAN L,YANHU Y,et al.Adsorption of aflatoxin B_1 on montmorillonite[J].Poultry Science,2005,84(6):959–961.

[39] LEE J T,JESSEN K A,BELTRAN R,et al.Effects of mycotoxin-contaminated diets and

deactivating compound in laying hens:2.Effects on white shell egg quality and characteristics[J].Poultry Science,2012,91(9):2096–2104.

[40] 伍宇超,杨维仁,杨在宾,等.低剂量玉米赤霉烯酮和吸附剂对育成期蛋鸡生长性能、血清生化指标和抗氧化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(4):1137–1144.

[41] SHI Y H,XU Z R,FENG J L,et al.Efficacy of modified montmorillonite nanocomposite to reduce the toxicity of aflatoxin in broiler chicks[J].Animal Feed Science and Technology,2006,129(1/2):138–148.

[42] AZIZPOUR A,MOGHADAM N.Effects of yeast glucomannan and sodium bentonite on the toxicity of aflatoxin in broilers[J].Brazilian Journal of Poultry Science,2015,17:7–13.

[43] LALA A,AJAYI O L,OSO A O,et al.Effect of dietary supplementation with clay-based binders on biochemical and histopathological changes in organs of turkey fed with aflatoxin-contaminated diets[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2016,100(6):1191–1202.

[44] SHANNON T A,LEDOUX D R,ROTTINGHAUS G E,et al.The efficacy of raw and concentrated bentonite clay in reducing the toxic effects of aflatoxin in broiler chicks[J].Poultry Science,2017,96(6):1651–1658.

[45] 陈继发,彭灿阳,曲湘勇,等.蒙脱石对产蛋鸡生产性能和盲肠菌群的影响[J].动物营养学报,2017,29(11):4026–4035.

[46] OSSELAERE A,SANTOS R,HAUTEKIET V,et al.Deoxynivalenol impairs hepatic and intestinal gene expression of selected oxidative stress,tight junction and inflammation proteins in broiler chickens,but addition of an adsorbing agent shifts the effects to the distal parts of the small intestine[J].PLoS One,2013,8(7):e69014.

[47] TANG Z G,WEN C,WANG L C,et al.Effects of zinc-bearing clinoptilolite on growth performance,cecal microflora and intestinal mucosal function of broiler chickens[J].Animal Feed Science and Technology,2014,189:98–106.

Functional Mechanisms of Montmorillonite and Its Application in Poultry Production[2]

CHEN Jifa KANG Kelang QU Xiangyong*

（*Hunan Co-Innovation Center of Animal Production Safety, College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*）

Abstract: Montmorillonite, a kind of natural aluminosilicate mineral, has laminated crystal structure. It has multiple bio-functions, such as adsorbing of mycotoxins, heavy metals and bacteria, repairing and protecting the digestive tract mucosa, and preventing and controlling

*Corresponding author, professor, E-mail: quxy99@126.com   （责任编辑　武海龙）

diarrhea. Moreover, modified montmorillonite has anti-microbial effects. It is reported that montmorillonite can increase production performance of animals, improve production quality, and promote intestinal health. This paper elaborated montmorillonite's physicochemical property, modification methods, main functions and mechanisms and summarized the latest research findings on the application of montmorillonite in poultry production.

Key words: montmorillonite; modification; mechanism; poultry; application